Journal of Agroecology
Vol. 12, No.4, Winter 2021, p. 581-594

نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، ص ۵۹۴-۵۸۱

مقاله علمی- پژوهشی

بهینه‌سازی آبیاری و تراکم کاشت ذرت (*Zea mays* L.) به‌کمک روش سطح-پاسخ

علیرضا کوچکی[1*]، مهدی نصیری محلاتی[1] و علی مؤمن[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۱۶

کوچکی، ع.، نصیری محلاتی، م.، و مؤمن، ع.، ۱۳۹۹. بهینه‌سازی آبیاری و تراکم کاشت ذرت (*Zea mays* L.) به‌کمک روش سطح‌پاسخ. بوم شناسی کشاورزی ۱۲(۴): ۵۹۴-۵۸۱.

چکیده

با افزایش کارایی مصرف آب از طریق عملیات مدیریتی نظیر تراکم مناسب کاشت و میزان آبیاری می‌توان در مناطق خشک و نیمه‌خشک عملکرد محصول را افزایش داد. به همین منظور آزمایشی در سال زراعی ۱۳۹۴ به‌روش سطح- پاسخ (RSM) در قالب طرح مرکب مرکزی با دو تکرار روی گیاه ذرت (*Zea mays* L.) در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. تیمارهای آزمایش با توجه به سطوح بالا و پایین حجم آبیاری (۶۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار) و تراکم کاشت (پنج و نه بوته در مترمربع) طراحی شدند. عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و کارایی مصرف آب به‌عنوان متغیرهای وابسته مورد ارزیابی قرار گرفتند و با استفاده از مدل رگرسیونی درجه دو کامل واکنش این صفات به متغیرهای مستقل (تراکم و آبیاری) محاسبه شدند. سپس مقدار مصرف آب و تراکم ذرت بر اساس سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی-زیست‌محیطی بهینه سازی شدند. در سناریوی اقتصادی با در نظر گرفتن هشت بوته در مترمربع و آبیاری ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار بیشترین میزان عملکرد اقتصادی با ۱۳۴۵/۸ گرم در مترمربع به‌دست آمد که در این شرایط عملکرد بیولوژیک و کارایی مصرف آب به‌ترتیب ۴۵۳۴/۷ گرم در مترمربع و ۰/۹۸ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب بود. در سناریوی زیست‌محیطی نیز از انتخاب تراکم هفت بوته در مترمربع و آبیاری ۷۹۳۹ مترمکعب در هکتار بیشترین میزان کارایی مصرف آب ($1/21$ kg.m^{-3}) حاصل شد که تحت این شرایط عملکرد دانه ۹۸۸/۶ گرم در مترمربع بود. بر اساس سناریوی اقتصادی-زیست محیطی، با انتخاب تراکم ۷/۵ بوته در مترمربع و آبیاری معادل ۱۰۸۴۸ مترمکعب در هکتار، بیشترین میزان عملکرد دانه و کارایی مصرف آب به‌ترتیب با ۱۲۴۰/۷ گرم در مترمربع و ۱/۱۶ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب به‌دست آمد. بنابراین، به‌طورکلی مصرف آب و انتخاب تراکم بر اساس سناریوی تلفیقی به‌دلیل در نظر گرفتن توأم مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی نسبت به سناریوهای دیگر برتری دارد.

واژه‌های کلیدی: سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی، طرح مرکب مرکزی، عملکرد اقتصادی، کارایی مصرف آب

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات شناخته شده است که نزدیک به ۳۰٪ تولیدات محصولات دانه‌ای در جهان را شامل می‌شود. اخیراً نیاز برای تولید ذرت افزایش یافته است که علاوه‌بر استفاده غذایی در بسیاری از کشورها، کاربردهایی نظیر تولید اتانول به‌عنوان سوخت زیستی و به شکل‌های سیلویی، علوفه و دانه‌ای برای چهارپایان استفاده می‌شود (Heng et al., 2009).

با توجه به تغییرات اقلیمی، افزایش تولید در شرایط بارندگی کم مناطق نیمه‌خشک به‌عنوان چالش مهمی مطرح شده است (Nyakudya & Stroosnijder, 2014) و کشاورزی در این مناطق اغلب در نتیجه پایین بودن کارایی مصرف آب بهره‌وری پایینی دارند (Wu et al., 2015). دلایل بسیار زیادی برای افزایش بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی وجود دارد که به‌طور کلی، می‌توان در

۱- استاد گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
۲- دانشجوی دکتری اگرواکولوژی گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: akooch@um.ac.ir)
Doi:10.22067/jag.v12i4.55311

سه گروه بزرگ طبقه‌بندی کرد: (۱) عواملی که با پایداری و بهبود محیط زیست مرتبطاند (Martín de Santa Olalla et al., 2007)؛ (۲) عواملی که با امنیت غذایی، افزایش جمعیت و تغییر اقلیم مرتبط‌اند (Rosenzweig & Parry, 1994; González, 2010) و (۳) عواملی که آب را به‌عنوان فاکتور تولیدی در نظرگرفته و سودآوری مزارع از نظر اقتصادی را مورد توجه قرار می‌دهند (MartínezValderrama et al., 2011; Domínguez et al., 2012). از این‌رو، با توجه به کمبود منابع آبی و عدم قطعیت از وضعیت بارش در نتیجه تغییرات اقلیمی بهبود کارایی مصرف آب ضروری است (Heng et al., 2009) که می‌توان از طریق روش‌های مدیریتی مناسب نظیر انتخاب ارقام با ریشه‌دهی عمیق، تراکم مناسب کاشت و مدیریت حاصلخیزی خاک، کارایی مصرف آب و عملکرد محصولات را افزایش داد (Rockström et al., 2010; Tittonell & Giller, 2013).

تعیین تراکم بهینه یکی از راهکارهای مؤثر در بهبود کارایی استفاده از منابع موجود و افزایش عملکرد در واحد سطح است (Nassiri Mahallati et al., 2015). تراکم کشت با توجه به ژنوتیپ گیاه به‌طور گسترده متفاوت است (Nyakudya & Stroosnijder, 2014). هدف اصلی افزایش تراکم کشت، بهبود کارایی استفاده از منابع در واحد سطح و افزایش عملکرد دانه و زیست‌توده می‌باشد (Testa et al., 2016). عملکرد دانه در شرایط عدم وجود تنش زیستی و غیرزیستی به حداکثر شاخص سطح برگ و میزان تشعشع جذب شده به‌وسیله تراکم بالای گیاهی با تسریع در بسته شدن کانوپی بستگی دارد (Cox & Cherney, 2001). ارقام جدید ذرت نسبت به ارقام قدیمی به‌دلیل تحمل بالا به رقابت درون‌گونه‌ای نسبت به تراکم‌های بالای گیاهی تحمل بیشتری دارند و در نتیجه، ناباروری و افت عملکرد در آن‌ها کاهش یافته است (Widdicombe & Thelen, 2002). متوسط تراکم ذرت در شرایط کشت فشرده در ایالت متحده آمریکا حدود هشت گیاه در مترمربع است (Li et al., 2015) درحالی‌که در شرایط اقلیمی اروپا تراکم از شش تا هشت گیاه در مترمربع برای هیبریدهای متوسط تا دیررس متفاوت است (Sharratt & McWilliams, 2005). در مناطق نیمه‌خشک اغلب ذرت را با تراکم پایین کشت می‌کنند. درحالی‌که، در شرایط رطوبتی مناسب تراکم شش تا ۱۱/۹ بوته در مترمربع توصیه شده است (Heng et al., 2009).

بین مقدار مصرف آب و تراکم گیاهان زراعی اثرات متقابل پیچیده‌ای وجود دارد (Gheysari et al., 2009). بنابراین، تعیین مقدار بهینه منابع از قبیل آب و واکنش گیاه به میزان تراکم و تعیین تراکم مطلوب در بوم‌نظام‌های زراعی، برای کاهش تلفات منابع و حصول عملکرد مناسب بسیار مهم و ضروری است (Koocheki et al., 2016). یکی از روش‌های مورد استفاده جهت بهینه‌سازی عوامل مختلف، استفاده از طرح مرکب مرکزی[1] است (Wu & Hamada, 2000) این طرح روشی جایگزین و مناسب برای آزمایشات فاکتوریل می‌باشد که توسط باکس و ویلسون (Box & Wilson, 1951) ارائه شد و بعدها توسط باکس و هانتر (Box & Hunter, 1957) اصلاح گردید. مزیت استفاده از طرح مرکب مرکزی نسبت به آزمایشات فاکتوریل، امکان استخراج اطلاعات بیشتر از تحلیل این طرح و تعداد کمتر تیمار و تکرارهای مورد نیاز جهت انجام آزمایش می‌باشد که اجرای این طرح را آسان‌تر می‌کند. همچنین، امکان تعیین ترکیب‌های مختلف متغیر مستقل را در آزمایش فراهم می‌آورد (Aslan, 2007). ازاین‌رو روش آماری مناسبی برای بهینه‌سازی سطوح فاکتورهای مورد بررسی برای دست‌یابی به اهداف مشخص می‌باشد. نتایج مطالعات بهینه‌سازی با استفاده از این طرح در زراعت کلزا نشان داد که در سناریوی اقتصادی، مقدار بهینه آب، کود و تراکم کلزا (*Brassica napus* L.) به‌ترتیب برابر با ۳۴۱۱ مترمکعب، ۱۷۸ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۱۱۹ بوته در مترمربع برآورد شد (Koocheki et al., 2014). همچنین، مقدار بهینه این تیمارها در سناریوی زیست‌محیطی به‌ترتیب ۱۸۰۲ مترمکعب، ۱۱ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۱۲۲ بوته در مترمربع و در سناریوی اقتصادی- زیست‌محیطی به‌ترتیب معادل ۲۳۴۷ مترمکعب، ۹۲ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و ۱۱۴ بوته در مترمربع به‌دست آمد. در مطالعه دیگری، مقدار بهینه آبیاری و کود نیتروژن در زراعت گندم در سناریوی اقتصادی به‌ترتیب ۲۷۴ کیلوگرم در هکتار کود اوره و ۳۹۶۴ مترمکعب در هکتار آبیاری به دست آمد (Koocheki et al., 2016). در سناریوی زیست‌محیطی، مقدار بهینه این منابع به‌منظور کاهش تلفات نیتروژن محاسبه شد و برای کوددهی و آبیاری به‌ترتیب مقادیر ۶۴/۶۵ کیلوگرم در هکتار و ۲۶۵۱ مترمکعب در هکتار به‌دست آمد. در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی عملکرد دانه و کاهش تلفات نیتروژن هم‌زمان مورد نظر قرار گرفت، در نتیجه مقادیر بهینه سطوح کوددهی و آبیاری به‌ترتیب معادل ۱۵۳ کیلوگرم در هکتار و ۳۰۳۰ مترمکعب به‌دست آمد.

1- Central composite design

جدول ۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک
Table 1- Soil physicochemical properties

اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	پتاسیم K ($mg.kg^{-1}$)	فسفر P ($mg.kg^{-1}$)	نیتروژن N (%)	بافت Texture
7.6	2.4	200	30	0.045	لومی- سیلتی Silt-loam

علی‌رغم تحقیقات گسترده‌ای که در مورد اثر سطوح مختلف آبیاری و تراکم کاشت روی گیاهان مختلف از جمله ذرت صورت گرفته است، اطلاعات موجود در زمینه بهینه‌سازی هم‌زمان این دو عامل با استفاده از روش سطح-پاسخ[1] اندک است، لذا این تحقیق با هدف بهینه‌سازی میزان مصرف آبیاری و تراکم کاشت با استفاده از طرح مرکب مرکزی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال زراعی ۱۳۹۴ به‌روش سطح- پاسخ (RSM) در قالب طرح مرکب مرکزی با دو تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول ۵۹ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا انجام شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری) مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده است.

طرح مرکب مرکزی تکنیک آماری است که در بهینه‌سازی فرایندهایی به‌کار برده می‌شود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تأثیر قرار می‌گیرد و با کمک این طرح تعداد آزمایش‌ها کاهش می‌یابد. مدل رگرسیونی برازش شده در این طرح به‌نحوی انتخاب شد که بتوان اثرات خطی، درجه دو و نیز اثرات متقابل بین فاکتورها را مورد ارزیابی قرار دهد (درجه دو کامل[2]). تیمارهای آزمایش با توجه به سطوح بالا و پایین حجم آبیاری (۶۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار) و تراکم کاشت (پنج و نه بوته در مترمربع) طراحی شدند و نقطه مرکزی به‌منظور برازش بهتر مدل و تخمین خطای آزمایش پنج مرتبه تکرار شد (جدول ۲). لازم به ذکر است که طرح مرکب مرکزی به‌صورت صاف[3] اجرا شد.

عملیات خاک‌ورزی اولیه شامل؛ شخم و لولر برای تسطیح زمین انجام گرفت و پس از آن نقشه طرح پیاده و کرت‌هایی به ابعاد ۱/۵ در سه متر ایجاد شد. فاصله روی ردیف ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) جهت کاشت ۲۰ سانتی‌متر در همه تیمارها ثابت در نظر گرفته شد. ازاین‌رو، جهت اجرای تراکم‌های پنج، هفت و نه بوته در مترمربع فاصله بین ردیف‌ها به‌ترتیب ۵۵، ۷۰ و ۸۵ سانتی‌متر تنظیم گردید. آبیاری بلافاصله پس از کاشت و پس از آن هر هفت روز یک بار انجام شد. با تقسیم کل دوره رشدی که گیاه نیاز به آبیاری داشت (۱۲۰ روز) بر دور آبیاری، تعداد مراحل آبیاری محاسبه شد و برای تعیین مقدار آبیاری در هر دوره، میزان کل آب مصرفی بر اساس تیمارهای ذکر شده (۶۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ مترمکعب) بر تعداد مراحل آبیاری تقسیم و با استفاده از کنتور در هر مرحله از آبیاری مقدار آب مورد نظر در هریک از تیمارها اعمال شد. کنترل علف‌های هرز در سه نوبت از طریق وجین‌دستی انجام گرفت.

در پایان فصل رشد، برای اندازه‌گیری عملکرد دانه و بیولوژیک هر کرت، تمام بوته‌ها از مساحت دو مترمربع برداشت شدند و بوته-های برداشت شده به‌مدت یک هفته در سایه و دمای معمولی قرار گرفتند و پس از توزین، میزان عملکرد دانه و ماده خشک تولیدی هر کرت مشخص شد.

کارایی مصرف آب طبق معادله ۱ محاسبه شد (Koocheki et al., 2014; Heydaripour et al., 2014).

معادله (۱)

$$WUE = \frac{Y_S}{W}$$

در این معادله، Ys: عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) و W: مقدار کل آب مصرفی (مترمکعب در هکتار) می‌باشد.

به‌منظور آنالیز نتایج، مدل درجه دو کامل با اثرات متقابل به داده‌های آزمایشی برازش داده شد (معادله ۲) و سپس بر اساس معیارهای آماری تجزیه رگرسیون (شامل مقادیر عدم برازش[4]، مقدار P و R^2) بهترین مدل انتخاب شد.

1- Response- surface methodology
2- Full quadratic regression
3- Face centered
4- Lack of fit

جدول ۲- ضرایب و تیمارهای طراحی شده برای یک تکرار جهت اجرای طرح مرکب مرکزی

Table 2- Coefficients and treatments designed for one replicate in order to performance a central composite design

تکرار Replication	ترکیب‌های تیماری Treatment combinations	ضرایب Coefficients		مقادیر Values	
		آبیاری Irrigation (x_2)	تراکم کاشت Plant density (x_1)	آبیاری Irrigation ($m^3.ha^{-1}$)	تراکم کاشت Plant density ($plants.m^{-2}$)
1	1	-1	-1	6000	5
1	2	0	-1	10000	5
1	3	+1	-1	14000	5
1	4	-1	0	6000	7
1	5	0	0	10000	7
1	6	0	0	10000	7
1	7	0	0	10000	7
1	8	0	0	10000	7
1	9	0	0	10000	7
1	10	+1	0	14000	7
1	11	-1	+1	6000	9
1	12	0	+1	10000	9
1	13	+1	+1	14000	9

*۱+، ۱- و ۰: به‌ترتیب سطوح بالا، پایین و میانگین را برای هر فاکتور نشان می‌دهد.

+1, -1, and 0: indicates up, down and mean level of each factor.

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_1^2 + a_4X_2^2 + a_5X_1X_2 \quad (۲) \text{ معادله}$$

در این معادله، Y: متغیر وابسته است که در این مطالعه عملکرد دانه ذرت، عملکرد بیولوژیک و کارایی مصرف آب می‌باشند، X_1: متغیر مستقل تراکم کشت و X_2: متغیر مستقل آبیاری بود و a_1 تا a_5: ضرایب معادله می‌باشند.

به‌منظور تعیین سطوح بهینه فاکتورها از روش سطح- پاسخ استفاده شد. به‌طوری‌که مقدار بهینه مصرف آب و تراکم ذرت بر اساس سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی- زیست‌محیطی محاسبه شد. بدین منظور، در سناریوی اقتصادی عملکرد دانه ذرت، در سناریوی زیست‌محیطی بالا بردن کارایی مصرف آب و مصرف کمتر منابع و در سناریوی اقتصادی- زیست‌محیطی حد متوسطی از عملکرد و مصرف آب مبنای برنامه- ریزی قرار گرفت (Koocheki et al., 2014). جهت آنالیز آماری داده‌ها و ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Minitab ver. 17 استفاده گردید.

نتایج و بحث

نتایج جدول تجزیه واریانس مدل رگرسیونی درجه دو کامل به‌همراه ضرایب رگرسیونی و ضریب تبیین (R^2) برای هر یک از متغیرهای وابسته شامل عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، کارایی مصرف آب (WUE) نشان داده شده است (جدول‌های ۳ و ۴).

عملکرد دانه

واکنش عملکرد دانه به تراکم کشت و آبیاری از یک تابع درجه دو پیروی کرد و این تابع ۹۵/۸ درصد تغییرات عملکرد دانه را توجیه نمود (جدول ۴). با توجه به نتایج جدول ۳ اثرات خطی، درجه دو و اثر متقابل فاکتورهای مورد بررسی معنی‌دار بودند ($p\leq۰/۰۱$) و از طرفی، آزمون عدم برازش مدل غیرمعنی‌دار بود ($p\geq۰/۰۵$) که نشان می‌دهد مدل رگرسیونی درجه دو به‌دست آمده توانایی پیش‌بینی اثرات متغیر مستقل بر متغیر وابسته و قابلیت برازش مدل را دارد (جدول ۳). در سطح پایین آبیاری (۶۰۰۰ مترمکعب در هکتار) تراکم کشت با عملکرد دانه به‌صورت درجه دو با یکدیگر رابطه داشتند (رأس سهمی به‌سمت بالا و منفی)، به‌گونه‌ای که با افزایش تراکم کشت از پنج به هفت بوته در مترمربع، عملکرد دانه ابتدا افزایش (۵۳ درصد) و سپس با افزایش تراکم به نه بوته کاهش (۱۲ درصد) یافت.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (مدل رگرسیونی درجه دو کامل) عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت تحت سطوح مختلف آبیاری و تراکم کاشت

Table 3- Analysis of variance (full quadratic regression model) for yield and WUE of maize under different treatments of irrigation and plant density

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	عملکرد دانه Grain yield		عملکرد بیولوژیک Biological yield		کارایی مصرف آب WUE	
		P-Value	میانگین مربعات Mean squares	P-Value	میانگین مربعات Mean squares	P-Value	میانگین مربعات Mean squares
مدل رگرسیون Regression	6	0.0001	232305	0.0001	1781782	0.0001	0.069
بلوک Blocks	1	0.337	3128	0.72	6327	0.371	0.003
خطی Linear	2	0.0001	522069	0.0001	4772844	0.0001	0.079
درجه دو Square	2	0.0001	158515	0.001	523295	0.0001	0.117
اثر متقابل Interaction	1	0.007	29537	0.182	92085	0.031	0.019
خطا Error	19		3228		47933		0.0034
عدم برازش Lack of fit	11	0.784	2529	0.33	25608	0.69	0.0029
خطای خالص Pure error	8		4189		78629		0.0041

جدول ٤- ضرایب رگرسیون و ضریب تبیین برای معادله رگرسیونی درجه دو کامل در متغیرهای وابسته

Table 4- Regression coefficients and R^2 of the full quadratic regression equation in dependent variables

ضرایب Coefficients	متغیرهای پاسخ: عملکرد دانه Grain yield		عملکرد بیولوژیک Biological yield		کارایی مصرف آب WUE	
	P-Value	Coef. (SE)	P-Value	Coef. (SE)	P-Value	Coef. (SE*)
a_0	0.0001	1176.9(±16.7)	0.0001	3887.4(±64.3)	0.0001	1.18(±0.017)
a_1	0.005	52.4(±16.4)	0.0001	348.8(±63.2)	0.031	0.04(±0.017)
a_2	0.0001	290.3(±16.4)	0.0001	820.9(±63.2)	0.0001	-0.11(±0.017)
a_3	0.0001	-116.9(±24.2)	0.549	-56.9(±93.2)	0.0001	-0.13(±0.025)
a_4	0.0001	-148.8(±24.2)	0.001	-3773(±93.2)	0.001	-0.10(±0.025)
a_5	0.007	60.8(±20.1)	0.182	10.3(±77.4)	0.031	0.05(±0.021)
R^2	95.79		92.15		86.26	

SE: خطای معیار ضرایب رگرسیونی

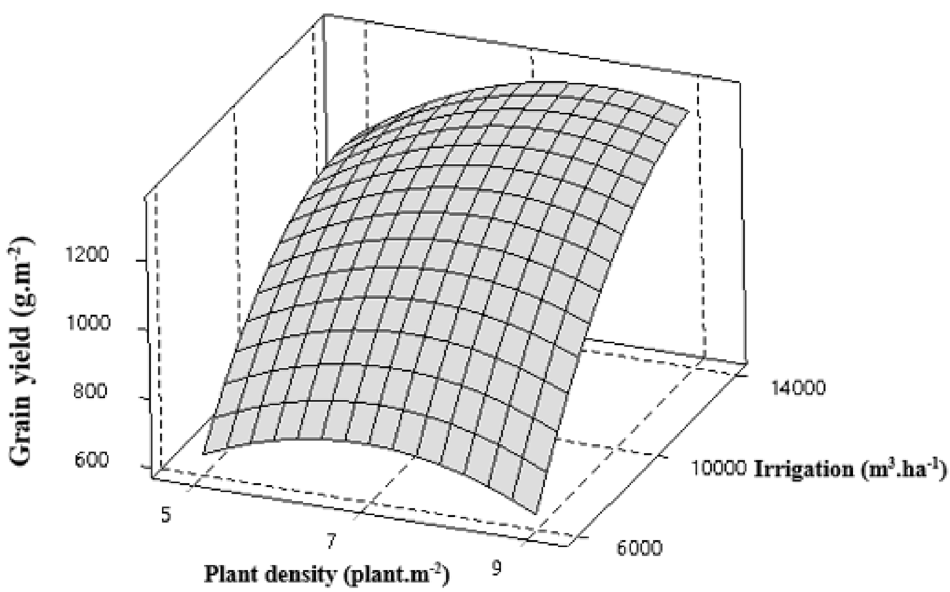
SE: standard error of regression coefficient

از طرف دیگر، با افزایش آبیاری از ۶۰۰۰ به ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار رابطه تراکم کشت و عملکرد دانه روندی تقریباً خطی داشت (شکل ۱). به نظر می‌رسد در سطوح پایین آبیاری، کاهش و افزایش تراکم کشت به‌ترتیب در نتیجه افزایش تبخیر از سطح خاک و افزایش رقابت در جذب منابع (نور و آب) باعث کاهش عملکرد دانه شده است. درحالی‌که در سطوح بالای آبیاری، با افزایش تراکم کشت عملکرد دانه به‌صورت خطی افزایش یافت و بیشترین میزان عملکرد دانه مشاهده شده با ۱۳۲۴/۹ گرم در مترمربع از تیمار ۱۴۰۰۰ مترمکعب آب در هکتار و تراکم نه بوته در مترمربع به‌دست آمد (جدول ۵). با این حال با برازش مدل بیشترین میزان عملکرد دانه با ۱۳۱۸/۴ گرم در مترمربع از تراکم هفت بوته در مترمربع و ۱۴۰۰۰ مترمکعب آب در هکتار به‌دست آمد (جدول ۵). از این‌رو چنین به نظر می‌رسد که با افزایش همزمان تراکم کشت و آبیاری به‌دلیل کمبود نور، تنها رشد رویشی افزایش یافته، در نتیجه عملکرد دانه نسبت به تراکم‌های

مطلوب (هفت بوته در مترمربع) کاهش نشان داده است. آل ناگـار و همکاران (Al-Naggar et al., 2015) نیز گزارش کردند کـه تـراکم بالای کشت در نتیجه کاهش در دسترس بودن نـور و سـایر منـابع، عملکرد دانه ذرت در هر بوته را کاهش می‌دهد که کـاهش عملکـرد عموماً در نتیجه کاهش تعداد بلال، کاهش دانه در بلال، پایین بودن وزن دانه و یا ترکیبی از این اجزای عملکرد باشد، امّا در شرایط بهینه آب و منابع تغذیه‌ای تراکم بـالای کشـت مـی‌توانـد باعـث افـزایش عملکرد شود. بنابراین، با توجه به نتایج بهینه‌سازی، جهت دست‌یابی به بیشترین عملکرد اقتصادی (۷۶/ ۱۳۴۵ گرم در مترمربـع) انتخـاب تراکم ۷/۹۵ بوته در مترمربع و آبیـاری ۱۴۰۰۰ مترمکعـب در هکتـار به‌منظور حداکثر نمودن عملکرد دانه ضروری به نظر می‌رسد (جـدول ۶). همچنین با توجه به شـیب افـزایش عملکـرد در نتیجـه افـزایش آبیاری و تراکم (تا حد بهینه) (شکل ۱)، می‌توان بیان نمود که عملکرد دانه ذرت با افزایش آبیاری با شیب تنـدتری در مقایسـه بـا افـزایش تراکم افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده واکنش بیشتر عملکرد دانه ذرت به‌میزان آب در مقایسه با تراکم کشت است. با این‌حال، افزایش تراکم کشت بیش از حد بهینه نیز به‌علت کاهش جذب تشعشع خورشـیدی در قسمت‌های پایین پوشش گیاهی باعث کاهش عملکـرد مـی‌شـود (Earley et al., 2001). پینتر و همکاران (Pinter et al., 1994) در آزمایشی هیبریدهـای ذرت حساس و متحمل به تراکم‌های مختلـف بوته (۴۰ تا ۱۶۰ هـزار بوتـه در هکتار) را بـر عملکـرد ذرت بررسـی نمودند. در این بررسی کمترین و بیشترین میزان عملکرد دانه به‌ترتیب از ۴۲ و ۱۱۸ هزار بوته در هکتار بـه‌دسـت آمـد. درینـی و مظـاهری (Darini & Mazaheri, 2003) نیز در بررسی اثر پنج سطح تـراکم بوته در منطقه جیرفت برعملکرد ذرت دانه‌ای، دریافتند که با افـزایش تراکم از ۷۰ به ۱۱۰ هزار بوته در هکتار عملکرد دانه افزایش می‌یابـد، امّا تعداد دانه در بلال را کاهش می‌دهد که در این بررسی تراکم ۱۱۰ هـزار بوتـه در هکتـار بهتـرین تـراکم کاشـت ذرت بـرای منطقـه جیرفت گـزارش شـد.

عملکرد بیولوژیک

بر اساس جدول ۳، مدل رگرسـیونی درجـه دو توانسـت بـه‌طـور معنی‌داری ($p\leq 0/01$) تأثیر متغیرهای مستقل بر عملکرد بیولوژیک را نشان دهد به‌گونه‌ای که با توجـه بـه ضـریب تبیـین ۹۲/۱۵ درصـد تغییرات عملکرد بیولوژیک تحت تأثیر متغیرهای مستقل قابل توجیـه است (جدول ۴).



شکل ۱- نمودار سطح- پاسخ عملکرد دانه ذرت تحت تأثیر تراکم کشت و آبیاری

Fig. 1- Response- surface for grain yield of maize with different plant density and irrigation levels

جدول ۵- میانگین مقادیر عملکرد و کارایی مصرف آب مشاهده شده و برازش شده ذرت تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری و تراکم کاشت

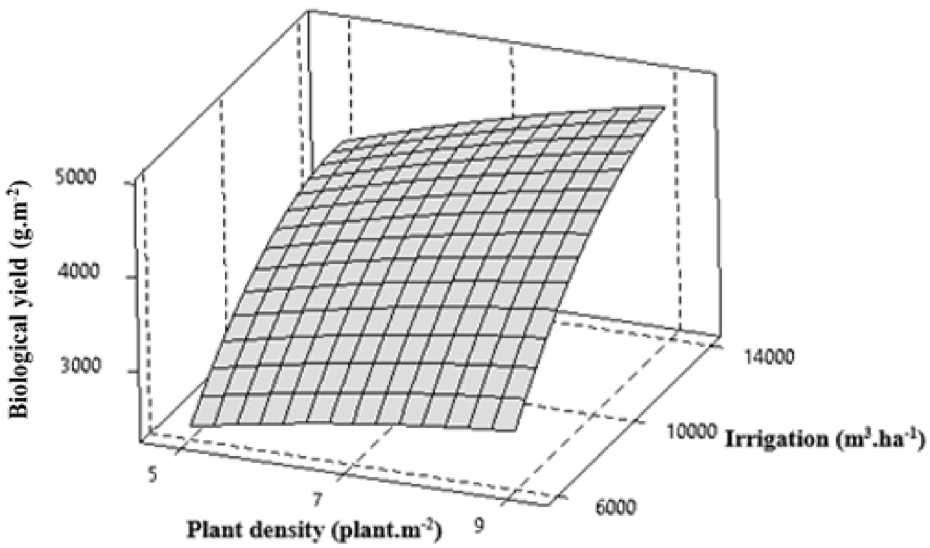
Table 5- The mean of observed and fitted values of maize yield and WUE as affected by irrigation and plant density

تیمار Treatment		عملکرد دانه Grain yield ($g.m^{-2}$)		عملکرد بیولوژیک Biological yield ($g.m^{-2}$)		کارایی مصرف آب WUE ($kg.m^{-3}$)	
تراکم کاشت Plant density ($plants.m^{-2}$) (x_1)	آبیاری Irrigation ($m^3.ha^{-1}$) (x_2)	برازش شده Fitted	مشاهده شده Observed	برازش شده Fitted	مشاهده شده Observed	برازش شده Fitted	مشاهده شده Observed
5	6000	629.3	640.2	2390.8	2425.5	1.07	1.07
5	10000	107.6	983.0	3481.8	3454.2	1.01	0.99
5	14000	1083.3	1102.0	3818.0	3811.0	0.76	0.79
7	6000	737.8	719.5	2689.2	2663.4	1.18	1.2
7	10000	1176.9	1160.4	3887.4	3986.0	1.18	1.17
7	10000	1176.9	1197.1	3887.4	3546.3	1.18	1.20
7	10000	1176.9	1143.5	3887.4	3935.4	1.18	1.14
7	10000	1176.9	1208.4	3887.4	3780.2	1.18	1.21
7	10000	1176.9	1217.5	3887.4	4157.5	1.18	1.22
7	14000	1318.4	1294.5	4330.9	4388.4	0.97	0.93
9	6000	612.5	620.0	2873.8	2865.0	1.05	1.03
9	10000	1112.3	1094.5	4179.3	4238.5	1.09	1.10
9	14000	1314.6	1324.9	4730.1	4679.7	0.93	0.95

همچنین آزمون عدم برازش مدل غیرمعنی‌دار بود ($p \geq ۰/۰۵$) که به‌طور کلی، نشان‌دهنده قابلیت بالای برازش مدل است (جدول ۳). بر اساس جدول ۳ اثرات خطی، درجه دو متغیرهای مستقل بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود ($p \leq ۰/۰۱$)، درحالی‌که اثر متقابل تراکم کاشت و آبیاری معنی‌دار ($p \geq ۰/۰۵$) نبود.

علامت ضرایب موجود در جدول ۴ نشان‌دهنده نوع رابطه بین فاکتورها (مستقیم یا معکوس) است. از این‌رو اثر تراکم کشت بر عملکرد بیولوژیک به‌صورت مستقیم و خطی بود (a_1=۳۴۸/۸). به‌طوری‌که، با افزایش تراکم کشت عملکرد بیولوژیک افزایش یافت. با افزایش تراکم کشت در نتیجه افزایش تعداد گیاه در واحد سطح عملکرد بیولوژیک افزایش یافت. به‌طوری‌که، بیشترین میزان عملکرد بیولوژیک مشاهده شده و برازش داده شده به‌ترتیب با ۴۶۷۹/۷ و ۴۷۳۰/۱ گرم در مترمربع از تیمار نه بوته در مترمربع و ۱۴۰۰۰ مترمکعب آب در هکتار مشاهده شد (جدول ۵). لیو و همکاران (Liu et al., 2004) نیز گزارش کردند که عملکرد ذرت در پاسخ به سطوح مختلف تراکم کاشت به‌علت تفاوت در پتانسیل ژنتیکی تفاوت قابل توجهی نشان می‌دهد. کوکس (Cox, 1996) طی آزمایشی واکنش عملکرد ذرت در سطوح مختلف تراکم بوته را مورد مطالعه قرار داد و گزارش کرد که برای تولید حداکثر ماده خشک نیاز به تراکم نه بوته در مترمربع می‌باشد.

با توجه به قدر مطلق ضرایب خطی (a_2=۸۲۰/۹) و درجه دو (a_4=-۳۷۷/۳)، مشخص می‌شود که رابطه عملکرد بیولوژیک و آبیاری روندی تقریباً خطی داشت که به نظر می‌رسد با افزایش فراهمی آب در تراکم‌های مختلف، رشد رویشی افزایش یافته و افزایش عملکرد بیولوژیک را به دنبال داشته است (شکل ۲). نتایج مطالعه‌ای نشان داد که با افزایش سطح آبیاری عملکرد بیولوژیک ذرت افزایش یافت و بیشترین میزان آن با ۲۳/۵۴ تن در هکتار از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز گیاه به‌دست آمد (Di Paolo & Rinaldi, 2008).



شکل ۲- نمودار سطح- پاسخ عملکرد بیولوژیک ذرت تحت تأثیر تراکم کشت و آبیاری

Fig. 2- Response- surface for biological yield of maize with different plant density and irrigation levels

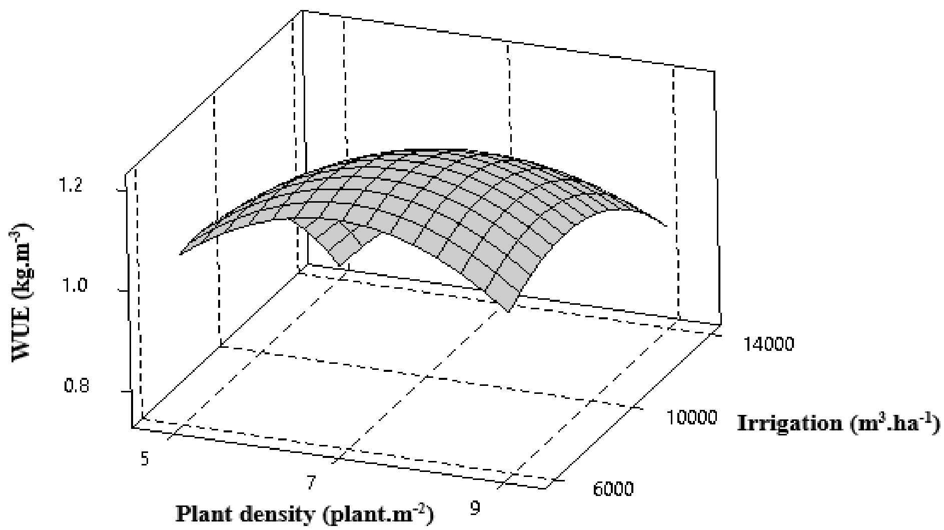
کارایی مصرف آب

نتایج جدول تجزیه واریانس مدل رگرسیونی نشان داد که اثرات خطی و درجه دو متغیرهای مستقل مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل تراکم کشت و آبیاری در سطح احتمال پنج درصد بر کارایی مصرف آب معنی‌دار بود (جدول ۳). مقدار عددی ضریب تبیین (R^2= ۸۶/۲۶) و غیرمعنی‌دار بودن آزمون عدم برازش مدل ($p\geq$۰/۰۵) نشان‌دهنده برازش نسبتاً خوب مدل رگرسیونی در برازش داده‌ها و قدرت پیش‌بینی مدل است (جدول ۳ و ۴). با توجه به ضرایب رگرسیونی مشخص می‌شود که رابطه بین تراکم کشت و کارایی مصرف آب هم به‌صورت مستقیم و خطی (a_1=۰/۰۴) و هم به‌صورت درجه دو (a_3=-۰/۱۳) و معکوس است (جدول ۴)، که با توجه به بیشتر بودن قدر مطلق ضریب درجه دوم، واکنش کارایی مصرف آب به تراکم کشت روندی تقریباً به‌صورت درجه دو دارد، به این معنی که با افزایش تراکم از پنج به هفت بوته در مترمربع ابتدا کارایی مصرف آب افزایش و سپس با افزایش تراکم به نه بوته در مترمربع کاهش می‌یابد (شکل ۳).

اثر آبیاری نیز بر کارایی مصرف آب نیز به‌صورت خطی و هم به‌صورت درجه دو است که با توجه به ضرایب رگرسیونی (جدول ۴) این رابطه به‌صورت منفی و معکوس است. بدین ترتیب که با افزایش مصرف آب کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که بیشترین کارایی مصرف آب مشاهد شده و برازش یافته با ۱/۲۲ و ۱/۱۸ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب از تیمار هفت بوته در مترمربع و ۱۰۰۰۰ مترمکعب آب در هکتار به‌دست آمد (جدول ۵).

با توجه به نتایج جدول ۵ مشخص می‌شود که در سطوح پایین (۶۰۰۰ مترمکعب در هکتار) و متوسط آبیاری (۱۰۰۰۰ هزار مترمکعب در هکتار)، بیشترین میزان کارایی مصرف آب مشاهده شده از تراکم هفت بوته در متربع به‌دست آمد، درحالی که در سطح بالای آبیاری (۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار) بیشترین میزان کارایی مصرف آب از تراکم نه بوته در متربع به‌دست آمد. با این وجود، نتایج کارایی مصرف آب برازش شده نشان داد که بیشترین میزان این کارایی در همه سطوح آبیاری از تراکم هفت بوته در مترمربع به‌دست آمد، در نتیجه بدون مدنظر قرار دادن عملکرد اقتصادی (دانه) با در نظر گرفتن تراکم ۷/۱ بوته در مترمربع و ۷۹۳۹/۴ مترمکعب آب در هکتار بیشترین میزان کارایی مصرف آب (۱/۲۱ $kg.m^{-3}$) حاصل شد (جدول ۶). نتایج مطالعه‌ای که به‌منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف تراکم و نیاز آبی بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت هیبرید سینگل کراس ۵۰۰ انجام شد، نشان داد که آبیاری به‌میزان ۱۲۵ درصد نیاز آبی با تراکم ۸۵ هزار بوته در هکتار بیشترین عملکرد را به‌میزان ۱۲ تن در هکتار تولید

کرد. همچنین تیمار مذکور پس از تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی با تراکم ۷۵ هزار بوته در هکتار از بیشترین میزان کارایی مصرف آب (۱/۲۲ کیلوگرم بر متر مکعب) برخوردار بود (Nakhjavani Moghadam et al., 2013). در آزمایشی به‌منظور مطالعه اثر سطوح مختلف آبیاری و تراکم کشت بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت مشاهده شد که سطوح بالای آبیاری به‌همراه تراکم کم و یا متوسط و یا سطوح پایین آبیاری به‌همراه تراکم پایین کشت به‌عنوان بهترین ترکیب تیماری جهت آبیاری معرفی شدند (El-Hendawy et al., 2008).



شکل ۳- نمودار سطح- پاسخ کارایی مصرف آب ذرت تحت تأثیر تراکم کشت و آبیاری

Fig. 3- Response- surface for water use efficiency of maize with different plant density and irrigation levels.

بهینه‌سازی

جدول ۶ مقادیر بهینه متغیرهای مستقل تراکم کاشت و آبیاری تحت سه سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی- زیست محیطی را بر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و کارایی مصرف آب را نشان می‌دهد. در سناریوی اقتصادی عملکرد دانه ذرت، در سناریوی زیست‌محیطی بالا بردن کارایی مصرف آب و مصرف کمتر منابع و در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی حد متوسطی از عملکرد و مصرف آب مبنای برنامه‌ریزی و به‌عنوان فاکتور اصلی تعیین‌کننده مقادیر بهینه منابع در نظر گرفته شد (Koocheki et al., 2014). شاخص مطلوبیت (DI[1]) بیانگر میزان دقت مدل در تعیین ترکیب تیمارهای مورد بررسی برای بدست آوردن متغیرهای وابسته می‌باشد که مقدار این شاخص هر چقدر به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مقدار متغیرهای وابسته تحت تأثیر متغیرهای مستقل می‌باشد (Mansouri et al., 2014). مقدار این شاخص بر اساس سناریوی اقتصادی، زیست‌محیطی و اقتصادی-زیست‌محیطی به‌ترتیب ۰/۹۸، ۰/۸۴ و ۰/۷۹ به‌دست آمد که بر این اساس در سناریوی اقتصادی (DI=۰/۹۸) بیشترین میزان دقت مدل در شبیه‌سازی مقدار متغیرهای وابسته مشاهده شد. بدین ترتیب، در سناریوی اقتصادی با در نظر گرفتن ۷/۹۵ بوته در مترمربع و آبیاری ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار بیشترین میزان عملکرد اقتصادی (۱۳۴۵/۸ گرم در مترمربع) به‌دست آمد که در چنین شرایط عملکرد بیولوژیک و کارایی مصرف آب به‌ترتیب ۴۵۳۴/۷ گرم در مترمربع و ۰/۹۸ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب بود (جدول ۶). در سناریوی زیست‌محیطی انتخاب تراکم ۷/۱ بوته در مترمربع و آبیاری ۷۹۳۹/۴ مترمکعب در هکتار بیشترین میزان کارایی مصرف آب ($1/21\ kg.m^{-3}$) حاصل شد که تحت این شرایط عملکرد دانه ۹۸۸/۶ گرم در مترمربع بود. در سناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی نیز با انتخاب تراکم ۷/۵ بوته در

1- Desirability index

مترمربع و آبیـاری ۱۰۸۴۸/۵ مترمکعـب در هکتـار بیشـترین میـزان عملکرد دانه و کارایی مصرف آب به‌ترتیب با ۱۲۴۰/۷ گرم در مترمربع و ۱/۱۶ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب به‌دسـت آمـد کـه در ایـن شرایط عملکرد بیولوژیک معادل ۴۱۲۸/۷ کیلوگرم در هکتار بود.

جدول ٦- مقادیر بهینه‌سازی شده تراکم بوته و آبیاری جهت دست‌یابی به متغیرهای وابسته مورد انتظار در سناریوهای مورد بررسی
Table 6- Optimized values of plant density and irrigation for achieving to the expected dependent variables based on evaluated scenarios

سناریوها Scenarios	متغیرهای مستقل Independent variables (X)		متغیرهای وابسته Dependent variables (Y)			شاخص مطلوبیت DI
	تراکم بوته plant density ($plants.m^{-2}$)	آبیاری Irrigation ($m^3.ha^{-1}$)	عملکرد دانه Grain yield ($g.m^{-2}$)	عملکرد بیولوژیک Biological yield ($g.m^{-2}$)	WUE ($kg.m^{-3}$)	
اقتصادی Economic	7.95	14000	1345.8	4534.7	0.98	0.98
زیست‌محیطی Ecological	7.1	7939.4	988.6	3378.9	1.21	0.84
اقتصادی-زیست‌محیطی Economic-Ecological	7.47	10848.5	1240.7	4128.7	1.16	0.79

نتیجه‌گیری

ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب مـی‌شـود که با بحران جدی آب مواجه است. از این رو، با توجه به کمبود منابع آب و مشکلات زیسـت‌محیطـی ناشـی از اسـتفاده بـیش از حـد آن، استفاده از راهکارهای مدیریتی نظیر تعیین تراکم مناسب کشت جهت بهینه‌سازی این منابع به‌منظـور افـزایش عملکـرد در واحـد سـطح و کارایی مصرف آب ضروری است. نتایج این مطالعه نیز نشان داد کـه اثر متقابل تراکم کشت و آبیاری در تعیین عملکرد اقتصادی و کارایی مصرف آب ذرت معنی‌دار بود و بیشترین کارایی مصـرف آب بـرازش شده در همه سطوح آبیاری از تراکم هفت بوته در مترمربع بـه‌دسـت آمد. در نتیجه، با انتخاب سناریوی زیست‌محیطی و با در نظر گرفتن تـراکم ۷/۱ بوتـه در مترمربـع و ۷۹۳۹/۴ مترمکعـب آب در هکتـار بیشترین میزان کـارایی مصـرف آب (۱/۲۱ $kg.m^{-3}$) بـه‌دسـت آمـد. بیشترین میزان عملکرد دانه با توجه به سـناریوی اقتصـادی نیـز بـا ۱۳۴۵/۸ گرم در مترمربع با اعمال تراکم هشـت بوتـه در مترمربـع و آبیاری ۱۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار به‌دست آمد کـه در ایـن شـرایط کمتـرین میـزان کـارایی مصـرف آب (۰/۹۸$kg.m^{-3}$) حاصـل شـد. بنابراین، بهترین راهکار جهت دست‌یابی به حداکثر عملکرد اقتصادی و کارایی مصرف آب در راستای کشاورزی پایـدار انتخـاب سـناریوی اقتصادی-زیست‌محیطی است که در این شرایط با اعمال تـراکم ۷/۵ بوته در مترمربع و آبیاری ۱۰۸۴۸/۵ مترمکعـب در هکتـار بیشـترین میزان عملکرد دانه و کارایی مصرف آب به‌ترتیب با ۱۲۴۰/۷ گـرم در مترمربع و ۱/۱۶ کیلوگرم به‌ازای هـر مترمکعـب آب بـه‌دسـت آمـد. بنابراین، به‌طورکلی مصرف آب و انتخاب تراکم بر اسـاس سـناریوی تلفیقـی بـه‌دلیـل در نظـر گـرفتن تـوأم بـه مسـائل اقتصـادی و زیست‌محیطی نسبت به سناریوهای دیگر برتری دارد.

سپاسگزاری

بودجـه ایـن طـرح از محـل پژوهـه شـماره ۳۳۰۴۸/۲ مـورخ ۱۳۹۴/۳/۱۵ معاونت پژوهشی و فنـاوری دانشـگاه فردوسـی مشـهد تأمین شده است که بدینوسیله سپاسگزاری می‌شود.

References

Al-Naggar, A.M.M., Shabana, R.A., Atta, M.M.M., and Al-khalil, T.H., 2015. Maize response to elevated plant density combined with lowered N-fertilizer rate is genotype-dependent. The Crop Journal 3: 96-109.

Aslan, N., 2007. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a multi-gravity separator for chromite concentreation. Powder Technology

86: 769–776.

Box, G.E.P., and Wilson, K.B., 1951. On the experimental attainment of optimum conditions. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology) 13: 1–45.

Box, G.E.P., and Hunter, J.S., 1957. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. The Institute of Mathematical Statistics p. 195-241.

Cox, W.J., 1996. Whole plant physiological and yield responses of maize to plant density. Agronomy Journal 88: 489-496.

Cox, W.J., and Cherney, J.R., 2001. Row spacing, plant density, and nitrogen effects on corn silage. Agronomy Journal 93: 597–602.

Darini, A., and Mazaheri, D., 2003. The effect of planting date and plant density on yield of corn (spring planting) in Jiroft. The Seventh Iranian Congress of Crop Sciense, Karaj, Irab. (In Persian)

Di Paolo, E., and Rinaldi, M., 2008. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. Field Crops Research 105: 202-210.

Domínguez, A., de Juan, J.A., Tarjuelo, J.M., Martínez, R.S., and Martínez-Romero, A., 2012. Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment. Agricultural Water Management 110: 67-77.

Earley, E., Rath, B., Sief, R.D., and Hageman, R.H., 2001. Effects of shade applied at different of plant development on corn production. Crop Science 7: 151-159.

El-Hendawy, S.E., El-Lattief, E.A.A., Ahmed, M.S., and Schmidhalter, U., 2008. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn. Agricultural Water Management 95: 836-844.

Gheysari, M., Mirlatifi, S.M., Bannayan, M., Homaee, M., and Hoogenboom, G., 2009. Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage. Agriculture and Water Management 96: 809-821.

González, H., 2010. Debates on food security and agrofood world governance. International Journal of Food Science and Technology 45(7): 1345–1352.

Heng, L.K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., and Steduto, P., 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. Agronomy Journal 101: 488–498.

Heydaripour, R., Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., and Zarea Feyzabadi, A., 2014. The effects of different levels of irrigation and nitrogen fertilizer on productivity and efficiency in corn (*Zea mays* L.), sugar beet (*Beta vulgaris* L.) and sesame (*Sesamum indicum* L.) Journal of Agroecology 6(2): 187-198. (In Persian with English Summary)

Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Fallahpour, F., and Amiri, M.B., 2016. Optimization of nitrogen fertilizer and irrigation in wheat cultivation by central composite design. Journal of Agroecology, In Press. (In Persian with English Summary)

Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Moradi, R., and Mansoori, H., 2014. Optimizing water, nitrogen and crop density in canola cultivation using response surface methodology and central composite design. Soil Science and Plant Nutrition 60: 286-298.

Li, J., Xie, R.Z., Wang, K.R., Ming, B., Guo, Y.Q., Zhang, G.Q., and Li, S.K., 2015. Variations in maize dry matter, harvest index, and grain yield with plant density. Agronomy Journal 107: 829-834.

Liu, W., Tollenaar, M., Stewart, G., and Deen, W., 2004. Response of corn grain yield to spatial and temporal variability in emergence. Crop Science 44: 847-854.

Mansouri, H., Banayan Aval, M., Rezvani Moghaddam, P., and Lakzian, A., 2014. Management of nitrogen, irrigation and planting density in Persian shallot (*Allium hirtifolium*) by using central composite optimizing method. Sustainable Agriculture and Production Science 24 (4.1): 41-60. (In Persian with English Summary)

Martín de Santa Olalla, F.J., Domínguez, A., Ortega, J.F., Artigao, A., and Fabeiro, C., 2007. Bayesian networks in planning a large aquifer in Eastern Mancha, Spain. Environmental Modelling and Software 22: 1089–1100.

Martínez-Valderrama, J., Ibánez, J., Alcalá, F.J., Domínguez, A., Yassin, M., and Puigdefábregas, J., 2011. The use of a hydrological-economic model to assess sustainability in groundwater-dependent agriculture in drylands. Journal of Hydrology 402: 80–91.

Nakhjavani Moghadam, M.M., Farhadi Oskouei, E., SadreQayan, S.H., and Najafi, E., 2013. The different levels of irrigation and plant density on yield and morphological traits Corn single cross-500 in Karaj. Iranian Journal of Field Crops Research 11(1): 13-22. (In Persian with English Summary)

Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., Amin Ghafouri, A., and Mahluji Rad, M., 2015. Optimizing corm size and density

in saffron (*Crocus sativus* L.) cultivation by central composite design. Saffron Agronomy and Technology 3(3): 167-177.

Nyakudya, I.W., and Stroosnijder, L., 2014. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. Agricultural Water Management 146: 280-296.

Pinter, L., Alfoldi, Z., and Paldi, E., 1994. Feed value of forage maize hybrids varting in tolerance to plant density. Agronomy Journal 86: 799- 804.

Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S.P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., Bruggeman, A., Farahani, J., and Qiang, Z., 2010. Managing water in rainfed agriculture—the need for a paradigm shift. Agricultural Water Management 97: 543–550.

Rosenzweig, C., and Parry, M., 1994. Potential impact of climate change on world food supply. Nature 367: 133–138.

Sharratt, B.S., and McWilliams, D., 2005. Microclimatic and rooting characteristics of narrow-row versus conventional-row corn. Agronomy Journal 97: 1129–1135.

Testa, G., Reyneri, A., and Blandino, M., 2016. Maize grain yield enhancement through high plant density cultivation with different inter-row and intra-row spacings. European Journal of Agronomy 72: 28-37.

Tittonell, P., and Giller, K.E., 2013. When yield gaps are poverty traps: the paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. Field Crops Research 143: 76–90.

Widdicombe, W.D., and Thelen, K.D., 2002. Row width and plant density effects on corn grain production in the northern corn belt. Agronomy Journal 94: 1020–1023.

Wu, C.F.J., and Hamada, M., 2000. Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization. New York.

Wu, Y., Jia, Z., Ren, X., Zhang, Y., Chen, X., Bing, H., and Zhang, P., 2015. Effects of ridge and furrow rainwater harvesting system combined with irrigation on improving water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) in semi-humid area of China. Agricultural Water Management 158: 1-9.

Journal of Agroecology
Vol. 12, No.4, Winter 2021, p. 581-594

نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، ص ۵۹۴-۵۸۱

Optimization of Irrigation and Plant Density of Corn (*Zea mays* L.) by Using Response-Surface Methodology

A. Koocheki[1*], M. Nassiri Mahallati[2] and A. Momen[2]

Submitted: 21-04-2016
Accepted: 06-08-2016

Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., and Momen, A., 2021. Optimization of irrigation and plant density of corn (*Zea mays* L.) by using response-surface methodology. Journal of Agroecology 12(4):581-594.

Introduction

Water and plant density have a complex interaction. Determination of optimum density is an effective strategy to improve the efficiency of available resources usage and to increase the yield per unit area. Despite extensive research on the effects of different levels of irrigation and plant density for different crops, including corn, information on the optimization of these resources, using response-surface methodology (RSM) is scarce. Therefore, the objective of this study was to determine the optimal level of irrigation and plant density in corn production based on central composite design (CCD).

Materials and Methods

An experiment was conducted by using response-surface methodology with the central composite design and two replications on corn at the Research Farm of Ferdowsi University of Mashhad, during the 2015 growing season. The experimental treatments were the highest and lowest levels of irrigation volume (6000 and 14000 $m^{3}.ha^{-1}$) and plant density (5 and 9 $plants.m^{-2}$). Grain yield (G_Y), biological yield (B_Y) and water use efficiency (WUE) were measured as response variables in a full quadratic polynomial model. Consumption rate of irrigation and density were optimized based on three scenarios: economic, environmental and eco-environmental. Grain yield of corn and WUE were considered as the main factors to determine the optimum level of treatments under the economical and environmental scenarios, respectively. In the eco-environmental scenario, the main factor was WUE and grain yield.

Results and Discussion

The results indicated that at low level of irrigation (6000 $m^3.ha^{-1}$) plant density and grain yield correlated with others as quadratic so that by increasing the density from 5 to 7 $plants.m^{-2}$,grain yield first increased and then decreased with enhancing density to 9 $plants.m^{-2}$.It seems that at low levels of irrigation, reduction and enhancement of plant density, respectively, as a result of increasing evaporation from soil surface and increasing competition in resource uptake (light and water) has reduced grain yield. Grain yield at high levels of irrigation showed a relatively linear relationship with incrementing plant density, and the highest grain yield with 1324.9 $g.m^{-2}$was obtained from treatment of 14000 $m^3.ha^{-1}$ of water and density of 9 $plants.m^{-2}$. Nevertheless, the results of model fitting showed that the highest grain yield with 1318.4 $g.m^{-2}$ was attained from the density of 7 $plants.m^{-2}$ and 14000 $m^3.ha^{-1}$ of water. Therefore, it seems that with the simultaneous enhancement in plant density and irrigation, vegetative growth due to lack of light has increased, as a result of grain yield than optimum densities (7 $plants.m^{-2}$) has shown a decrease.

The regression model could significantly indicate that impact of independent variables on the grain yield, biological yield and water use efficiency (dependent variable). In economic scenario with considering 8 $plants.m^{-2}$ and irrigation of 14000 $m^3.ha^{-1}$ the maximum of economical yield with 1345.8 $g.m^{-2}$ was achieved in which biological yield and water use efficiency were 4534.7 $gr.m^{-2}$ and 0.98 $kg.m^{-3}$ of water, respectively. In

1- Professor, Agrotechnology Department, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
2- Ph.D. student in Agroecology, Agrotechnology Department, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
(*- Corresponding Author Email: akooch@um.ac.ir)
Doi:10.22067/jag.v12i4.55311

environmental scenario also the choice of the density of 7 plants.m^{-2} and irrigation of 7939 $m^3.ha^{-1}$ the highest water use efficiency (1.21 kg.m^{-3}) was attained in which grain yield that was 988.6 g.m^{-2}. Based on eco-environmental scenario with choice of the density of 7.5 plants.m^{-2} and irrigation of 10848.5 $m^3.ha^{-1}$ the maximum grain yield and water use efficiency was obtained in 1240.7 g.m^{-2} and 1.16 kg.m^{-3} of water, respectively.

Conclusion

Due to lack of water resources and environmental problems caused by the excessive use of water, applying appropriate management practices such as proper planting density to optimize these resources is essential. The best way to achieve the highest economic yield and water use efficiency and, to reach sustainable agriculture is the choice of eco-environmental scenario in which by application of the density of 7.5 plants.m^{-2} and irrigation level of 10848.5 $m^3.ha^{-1}$ the maximum grain yield and water use efficiency with 1240.7 g.m^{-2} and 1.16 kg.m^{-3} of water was obtained, respectively.

Keywords: Central composite design, Eco-environmental scenario, Economic yield, Water use efficiency